رفتار خاک‌های مخلوط رس- ماسه تحت شرایط سه‌محوری زهکشی‌نشده★

(یادداشت پژوهشی)

حسین سلطانی جیقه[۱]

چکیده *مطالعات قبلی برروی رفتار خاک‌های رس مخلوط با مصالح دانه‌ای نشان می‌دهد که در عمدهٔ آنها سطح تنش محصورکننده طوری بوده است که نمونه‌ها شبیه رس‌های عادی تحکیم‌یافته رفتار نموده‌اند و با افزایش درصد مصالح دانه‌ای مقاومت برشی و اضافه‌فشار آب حفره‌ای زیاد شده است. در برخی از تحقیق‌ها نتایج متناقض نیز هستند و همچنین اثر اندازهٔ دانه‌های مصالح درشت‌دانه واضح نمی‌باشد. برای شناخت جامع رفتار این خاک‌ها، آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی‌نشده برروی نمونه‌های رس و مخلوط رس-ماسه تحت محدودهٔ گسترده‌ای از تنش‌های محصورکننده انجام شد. نتایج نشان داد رفتار این خاک‌ها به درصد ماسهٔ موجود در مخلوط و اندازهٔ آن بستگی دارد. با افزودن ۶۰٪ ماسه به رس مقاومت برشی افزایش دارد و نمونه‌های مخلوط حاوی ماسهٔ ریز نسبت به مخلوط مشابه حاوی ماسهٔ درشت مقاومت برشی کمتری دارند. همچنین بسته به اندازه و درصد ماسه، رفتار نمونه‌ها از نوع انقباضی به نوع اتساعی تغییر می‌یابد؛ به‌طوری‌که در تنش‌های محصورکنندهٔ پایین، با افزایش درصد ماسه از صفر تا ۶۰٪، رفتار نمونه‌ها از نوع انقباضی به کمی اتساعی و سپس در نمونه‌های حاوی ۶۰٪ ماسه به شدیدا اتساعی تغییر می‌کند. حال آن‌که، در تنش محصورکنندهٔ زیاد، به‌غیراز نمونهٔ حاوی ۶۰٪ ماسه رفتار سایر نمونه‌ها کاملا انقباضی است.*

واژه‌های کلیدی مخلوط رس- ماسه، آزمایش سه‌محوری، بارگذاری زهکشی‌نشده، فشار آب حفره‌ای.

Behavior of Clay-Sand Mixtures under Undrained Triaxial Conditions

H. Soltani-Jigheh

Abstract *Previous studies on the behavior of clayey soil mixed with granular materials shows that major researches has been done under low confining stress level so that they almost exhibit behavior similar to normally consolidated clayey soils and by increasing content of granular materials both of the shear strength and excess pore water have been raised. In some researches, the results are inconsistent and the effect of grain size of granular materials is not clear. To study the behavior of these soils comprehensively, a series of consolidated undrained triaxial tests carried out on the clay and clay – sand mixtures under a wide range of confining stresses. The results show that the behavior of these soils depends on sand content and grain size. Adding 60% sand to clay, the shear strength increases and the mixtures consist of fine sand has lower strength in comparison with those of including coarse sand. It also observed that dependent on content and size of sands, the behaviors of specimens change from contractive to dilative one. So that at low confining stresses, by an increase in sand content from 0% to 60%, the behavior of samples change from contractive to slight dilation and then it is observed heavily dilation at samples include 60% sand.*

Key words Clay-Sand Mixtures, Triaxial Test, Undrained Loading, Pore Water Pressure.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۶/۲۶ و تاریخ پذیرش آن ۹۶/۸/۲۴ می‌باشد.

(۱) دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی، آذربایجان.

Email: hsoltani@azaruniv.ac.ir

مقدمه

رس‌های مخلوط با مصالح دانه‌ای در هستهٔ سدهای خاکی و سنگریزه‌ای استفاده می‌شوند و یا به‌طور طبیعی مهندسان ژئوتکنیک با آنها مواجه هستند. برای مثال، مصالح حاصل از زمین‌لغزش‌ها، یخرفت‌ها، خاک‌های رسوبی، جریان‌های آواری و... در طبیعت اغلب شامل مخلوط مصالح درشت‌دانه (شن و ماسه) و مصالح ریزدانه (رس و لای) می‌باشند [1-4]. همچنین مخلوط‌های ماسه با خاک رس دارای خمیری بالا به عنوان پوشش مدفن‌های بهداشتی استفاده می‌شوند [5, 6]. دانه‌بندی این خاک‌ها گسترده است و ساختار و بافت آنها به درصد ذرات رس و مصالح دانه‌ای وابسته است. مطالعات متعددی برروی ویژگی‌های مختلف مخلوط‌های رس- ماسه در ادبیات فنی موجود است، لیکن ازآنجایی‌که در این پژوهش هدف ارزیابی رفتار تنش- کرنش، مقاومت برشی، مدول تغییرشکل و فشار آب حفره‌ای خاک‌های رسی مخلوط می‌باشد فقط به تحقیقات انجام‌شده در این زمینه اشاره شده است.

هولتز و ویلارد با انجام آزمایش‌های سه‌محوری برروی خاک مخلوط رس و شن نتیجه گرفتند که با زیاد شدن درصد شن، زاویهٔ اصطکاک مخلوط زیاد می‌شود و چسبندگی آن کاهش پیدا می‌کند [7]. ناکاسه و همکاران و کامی و ناکاسه آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته همسان زهکشی‌نشده برروی نمونه‌های مخلوط ماسه و رس انجام دادند و دریافتند که با افزایش مقدار ماسه فشار آب حفره‌ای بیشتری در مخلوط ایجاد می‌شود [8, 9]. نتایج آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی‌نشدهٔ اومین و همکاران برروی مخلوط‌های رس- ماسه (با مقدار ماسهٔ متغیر از صفر تا ۸۰٪) نشان داد که مخلوط حاوی ٦۰٪ ماسه بیشترین مقاومت را دارد [10]. کیمورا و همکاران آزمایش‌های مشابهی برروی نمونه‌های مخلوط ماسه و رس کاوازاکی انجام دادند [11].

بی‌اوغلو آزمایش‌های ادئومتری، برش مستقیم و سه محوری زهکشی‌نشده برروی مخلوط‌های رس- ماسه انجام داده، و نشان داد که زاویهٔ اصطکاک داخلی مؤثر مخلوط‌های رس- ماسه تاوقتی‌که مقدار ریزدانه کمتر از ۵۰٪ باشد بین ۳۰ تا ۳۸ درجه می‌باشد. در مقدار ریزدانه بیشتر از ۵۰٪، زاویهٔ اصطکاک داخلی به‌شدت کم می‌شود و تا °۱۰ نیز می‌رسد. در نتایج آزمایش‌های سه-محوری زهکشی‌نشده انجام‌شده توسط وی رابطهٔ واضحی بین زاویهٔ اصطکاک داخلی و درصد مصالح ریزدانه دیده نشد [12].

نتایج آزمایش‌های برش مستقیم برروی مخلوط‌های ماسه اتاوا- رس کائولن توسط والژو و مابی نشان داد که مقاومت برشی مخلوط‌ها به مقدار ماسه بستگی دارد. وقتی مقدار ماسه از ۷۵٪ بیشتر است، مقاومت برشی مخلوط با مقاومت برشی ماسهٔ خالص برابر است. درصورتی‌که مقدار ماسه کمتر از ٤۰٪ باشد، مقاومت برشی مخلوط با مقاومت برشی رس یکی می-باشد. با افزایش مقدار ماسه از ٤۰٪ تا ۷۵٪، مقاومت برشی از مقاومت رس به‌مقدار متناظر ماسهٔ خالص کاهش پیدا می‌کند. نامبردگان براساس نتایج تحقیقات دیگران گزارش کردند که در خاک‌های مخلوط با میزان مصالح دانه‌ای بین ٥٦٪ و ۷٦٪، مقاومت برشی مخلوط ترکیبی از مقاومت اصطکاکی مصالح دانه‌ای و مقاومت برشی رس می‌باشد. برای مخلوط‌های با مقادیر مصالح دانه‌ای کمتر از ٥٦٪ و بیشتر از ۷٦٪، مقاومت برشی مخلوط‌ها به‌ترتیب برابر با مقاومت برشی رس و مقاومت اصطکاکی مصالح دانه‌ای می‌باشد [2].

نتایج آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی‌نشدهٔ جعفری و شفیعی برروی نمونه‌های رس خالص، مخلوط رس- ماسه و رس- شن در تنش‌های محصورکنندهٔ مختلف نشان دادند که در تنش محصورکنندهٔ ثابت، با افزایش میزان مصالح دانه‌ای از ۰٪ به ٦۰٪، فشار آب حفره‌ای بیشتری ایجاد می‌شود و زاویهٔ اصطکاک داخلی حدود °۱۰ بیشتر می‌شود. نتایج این مطالعات نشان داد که در تنش محصورکنندهٔ بالا، نرخ افزایش فشار آب حفره‌ای بیشتر است. نامبردگان نتیجه گرفتند که اندازهٔ دانه‌ها تأثیر چندانی بر فشار آب حفره‌ای ندارد [13].

پراکاشا و چاندراسکاران مشاهده کردند که با زیادشدن مقدار ماسه در رس‌های ماسه‌دار، مقاومت برشی زهکشی‌نشده کم و فشار آب حفره‌ای زیاد می‌شود

و در مقدار ماسه ۹۰٪ روند رفتار برعکس می‌گردد [14].

سلطانی و سروش با انجام آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی‌نشده برروی نمونه‌های رس، مخلوط رس-ماسه و رس-شن مشاهده کردند که مقاومت برشی و فشار آب حفره‌ای ایجادشده در نمونه‌ها، به درصد ماسه یا شن و اندازهٔ آنها بستگی دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش درصد مصالح دانه‌ای و کوچک‌ترشدن اندازهٔ دانه‌ها فشار آب حفره‌ای بیشتری در مخلوط ایجاد می‌شود. همچنین نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که مدول تغییرشکل سکانت نیز با افزایش درصد مصالح دانه‌ای افزایش پیدا می‌کند[۱۵]. مطالعهٔ راهادژو و همکاران نیز نشان داد که زاویهٔ اصطکاک داخلی با افزایش خرده‌گرانیت در مخلوط زیاد می‌شود [4].

سلطانی و همکاران با انجام آزمایش‌های برش مستقیم دریافتند که افزودن مصالح دانه‌ای تا ۴۰٪ به رس تأثیری در بهبود مقاومت برشی ندارد و مقدار ۲۰٪ مصالح دانه‌ای باعث کاهش مقاومت برشی نیز می‌شود. افزودن ۶۰٪ ماسه به رس، مقاومت برشی را به‌شدت بهبود می‌بخشد و نرخ افزایش مقاومت در رس‌های با خمیری بالا زیاد می‌باشد [16].

پترز و برنی رفتار سه‌محوری مخلوط ماسه با خاک رس سیلت‌دار را بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که وقتی مقدار ماسه از یک حد مرزی بیشتر باشد رفتار مخلوط از انقباضی به اتساعی تغییر می‌یابد [17].

پاکباز و سیادتی مقدم اثر دانه‌بندی ماسه و درصد رس را برروی مقاومت برشی مخلوط رس- ماسه بیش‌تحکیم‌یافته مطالعه نمودند [18]. نتایج نشان داد که در میزان رس حدود ۳۰٪ ویژگی‌های مقاومت برشی و تنش- کرنش نمونه‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه تغییر می‌کند.

در بررسی رفتار سه‌محوری زهکشی‌نشدهٔ ماسهٔ مخلوط با رس کائولینیت، با مقدار رس متغیر از ۰ تا ۱۰۰ درصد، تحت تنش محصورکنندهٔ ۱۵۰ kPa مشخص گردید که مرزی برای درصد رس وجود دارد که رفتار تنش- کرنش تغییر می‌کند و شیب خط گسیختگی نمونه‌ها نیز متفاوت می‌باشد [19].

یانگ و همکاران دریافتند که مقاومت فشاری تک‌محوری با افزایش درصد ریزدانه زیاد می‌شود؛ لیکن نرخ افزایش مقاومت وقتی ریزدانه از ۵۵٪ به ۷۵٪ زیاد می‌شود چشم‌گیر است و در سایر بازه‌ها تدریجی است [20]. الکادی و همکاران با انجام آزمایش برش مستقیم نتیجه گرفتند که حداکثر مقاومت برشی در مقدار رس ۳۰٪ رخ می‌دهد و سه شکل رفتار تنش- کرنش برای مخلوط رس- ماسه مشاهده نمودند که به‌شدت به میزان رس، شرایط اولیهٔ نمونه، تنش نرمال و رطوبت وابسته است [21].

یکی از عمده کاربردهای مصالح مخلوط در عمل در هستهٔ سدهای خاکی برای کاهش امکان وقوع قوس‌زدگی با کم کردن اختلاف سختی‌های مصالح هسته و پوسته، و یا افزایش مقاومت هستهٔ سدها و پوشش مدفن‌های بهداشتی می‌باشد. از طرف دیگر، نتایج برخی مطالعات نشان می‌دهند که با زیادشدن درصد مصالح دانه‌ای در نمونه‌ها اضافه‌فشار آب حفره‌ای ایجادشده در آنها بیشتر می‌گردد [8-15,13,11] و این خود احتمال وقوع پدیدهٔ شکست هیدرولیکی را بیشتر می‌نماید که یکی از مخاطرات اصلی در هستهٔ سدها می‌باشد. ضمنا در بعضی از تحقیق‌ها کاهش در فشار آب حفره‌ای هم مشاهده شده است [14]. برخی از مطالعات این نوع خاک‌ها در درصد مصالح دانه‌ای بیشتر تغییر در نوع رفتار از خود نشان می‌دهند [17- 19, 21]. بنابراین، دیده می‌شود که اثر مصالح دانه‌ای بر مقاومت برشی، پارامترهای تغییرشکلی و فشار آب حفره‌ای رس‌های مخلوط با ماسه و شن کاملا واضح نیست و اثر اندازهٔ دانه‌ها بر رفتار آنها، به‌ویژه در تنش‌های محصورکنندهٔ پایین، مشخص نیست.

درنتیجه، باتوجه به اهمیت رفتار تنش- کرنش، مقاومت برشی و فشار آب حفره‌ای در طراحی سازه‌های خاکی متشکل از این نوع خاک‌ها و یا سازه‌های واقع برروی آنها لازم است که رفتارشان دقیقا مطالعه شود. هدف اصلی این تحقیق این است که آیا این مصالح واقعا در تمامی شرایط تنش‌ها رفتار مشابه دارند یا بسته به‌مقدار تنش محصورکننده و اندازهٔ دانه‌ها نوع رفتار آنها تغییر می‌کند.

برای این منظور، در این مقاله، رفتار نمونه‌های متراکم رس خالص و مخلوط رس- ماسه با انجام آزمایش‌های سه‌محوری فشاری در شرایط تحکیم‌یافتهٔ زهکشی‌نشده مطالعه می‌شود، و اثر درصد ماسه و اندازهٔ دانه‌ها و تنش محصورکننده بر رفتار تنش- کرنش، تغییرات فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است علت انجام آزمایش‌های تحکیم‌یافتهٔ زهکشی‌نشده ارزیابی نحوهٔ تغییرات اضافه‌فشار آب حفره‌ای و نیز مسیر تنش مؤثر در نمونه‌های با درصد ماسهٔ متفاوت برای بررسی نوع رفتار (انقباضی یا اتساعی) می‌باشد.

برنامهٔ آزمایش‌ها و مصالح استفاده‌شدهٔ

دستگاه آزمایش سه‌محوری

در این پژوهش برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه سه‌محوری، با قابلیت اعمال بار یکنواخت به روش کنترل کرنش، استفاده شد. این دستگاه قابلیت انجام آزمایش برروی نمونه‌های به قطر ۳۸ mm و ۵۰ mm را دارد. به‌غیر از تغییرات حجم نمونه‌ها، تمامی اندازه‌گیری‌ها اعم از فشارهای محفظه و پس‌فشار، نیروی محوری، فشار آب حفره‌ای و تغییرمکان به‌طور اتوماتیک توسط حسگرهای الکترونیکی یادداشت شد.

مصالح

در این تحقیق هفت نمونه با ترکیب رس- ماسه و رس خالص آزمایش شد. رس مورد استفاده در نمونه‌ها از محوطهٔ دانشگاه شهید مدنی آذربایجان تهیه شد. حد روانی و نشانهٔ خمیری رس به‌ترتیب ۳۳٪ و ۱۲٪، و تودهٔ ویژه آن ۲/٦۹۸ تعیین گردید. در تهیهٔ نمونه‌ها از دو نوع ماسه با نام‌های S1 (مصالح باقی‌مانده بین الک‌های شمارهٔ ٦ و ۸) و S2 (مصالح باقی‌مانده بین الک‌های شمارهٔ ۱۲ و ۱٦) استفاده شد. متوسط اندازهٔ دانه‌های این ماسه‌ها به‌ترتیب ۲/۸۰۵ و ۱/٤٤ میلی‌متر می‌باشد. نمونه‌های رس- ماسه از مخلوط مقادیر مختلف وزن خشک رس و ماسه تهیه شدند و با نام‌های AC100، S1-AC80، S1-AC60، S1-AC40، S2-AC80، S2-AC60 و S2-AC40 نام‌گذاری گردیدند. در نام نمونه‌ها حرف اول نشانگر نوع ماسه (S1 و S2 برای ماسه)، حرف AC نشانگر رس و عدد بعد از حروف نشان‌دهندهٔ درصد وزنی رس در نمونه می‌باشد. فهرست نمونه‌ها به‌همراه برخی از مشخصات آنها در جدول (۱) آمده است.

روش تهیهٔ نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها

نمونه‌ها با رطوبت ۲٪ بیشتر از رطوبت بهینه و ۹۵٪ وزن مخصوص خشک حداکثر حاصل از آزمایش پروکتور استاندارد تهیه شدند [22]. قطر و ارتفاع نمونه‌ها به‌ترتیب ۳/۸ و ۷/٦ سانتی‌متر بود و در ۳ لایه تهیه شدند. برای ماندن درصد اختلاط مصالح و پخش یکنواخت رطوبت، مصالح هر لایه در کیسه‌های پلاستیکی مجزا تهیه و حدود ۲٤ ساعت بعد از آماده‌سازی ساخته شدند. سپس نمونه‌ها درون محفظه سه‌محوری قرار داده شدند و با عبور دادن آب مقطر از داخل نمونه و اعمال پس‌فشار نهایی (پس از رسیدن درصد اشباع (B) به حدود ۰/۹۷) اشباع شدند. درنهایت نمونه‌ها تحت تنش‌های محصورکنندهٔ (σ'_c) ۵۰ kPa، ۱۰۰ kPa و ۵۰۰ kPa تحکیم یافتند و در شرایط زهکشی‌نشده بارگذاری شدند [23].

جدول ۱ نام و مشخصات نمونه‌های آزمایش‌شده

ردیف	نام نمونه	ماسه (٪)	رطوبت بهینه (٪)	وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)
۱	AC100	۰	۱۹/۵	۱٦/۵
۲	S1-AC80	۲۰	۱۵/۸	۱۷/۹
۳	S1-AC60	٤۰	۱۲/۷۵	۱۹/٤
٤	S1-AC40	٦۰	۱۲/۵	۲۰/۱
۵	S2-AC80	۲۰	۱٦/۵	۱۷/۵
٦	S2-AC60	٤۰	۱۵/۱	۱۸/۵
۷	S2-AC40	٦۰	۱٤/۹	۱۸/۹

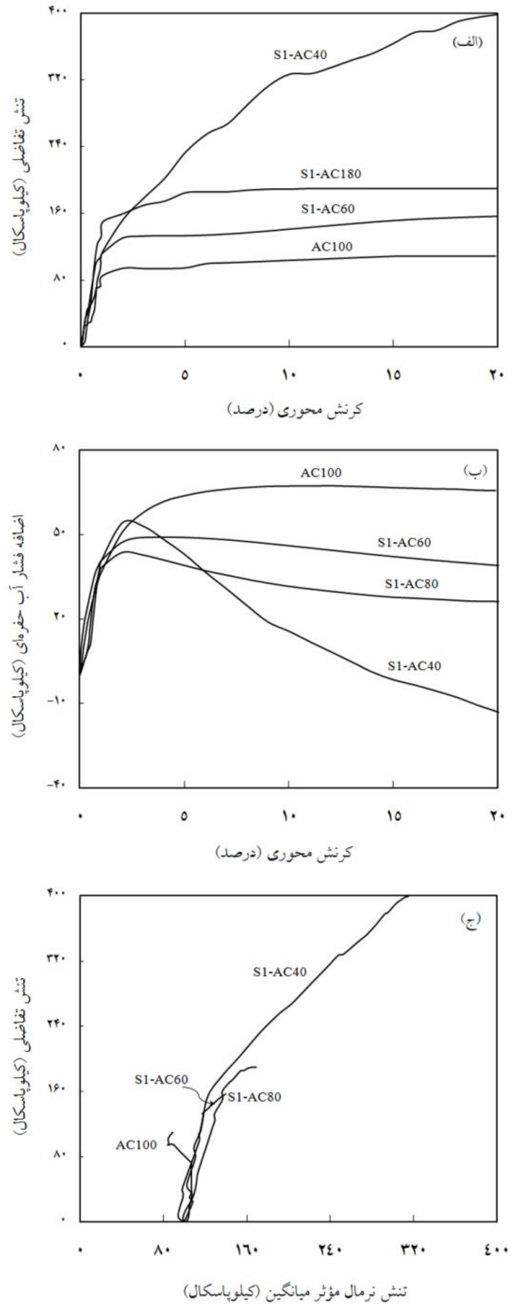
نتایج

رفتار تنش‌ـ کرنش، فشار آب حفره‌ای و مسیرتنش (در فضای q':p') برای نمونه‌های AC100، S1-AC80، S1-AC60 و S1-AC40 در تنش محصورکنندهٔ ۱۰۰ kPa در شکل (۱) نشان داده شده است. نمودارهای مشابه برای نمونه‌های AC100، S2-AC80، S2-AC60 و S2-AC40 تحت تنش محصورکنندهٔ ۵۰ kPa در شکل (۲) آمده است. در بخش الف و ب شکل‌ها، محور قائم به‌ترتیب تنش تفاضلی ($q'=\sigma'_1-\sigma'_3$) و فشار آب حفره‌ای (Δu)، و محور افقی هر دو کرنش محوری (ε_a) می‌باشد. در نمودارهای مسیرتنش، محور افقی تنش مؤثر میانگین ($p'=(\sigma'_1+2\sigma'_3)/3$) و محور قائم تنش تفاضلی است. لازم به ذکر است فقط نتایج تیپ آزمایش‌ها در این شکل‌ها ارائه گردیده است، لیکن در ارزیابی‌ها و تحلیل‌های بخش‌های بعدی نتایج همهٔ آزمایش‌ها لحاظ می‌شوند.

تحلیل نتایج

اثر درصد ماسه بر رفتار تنش- کرنش

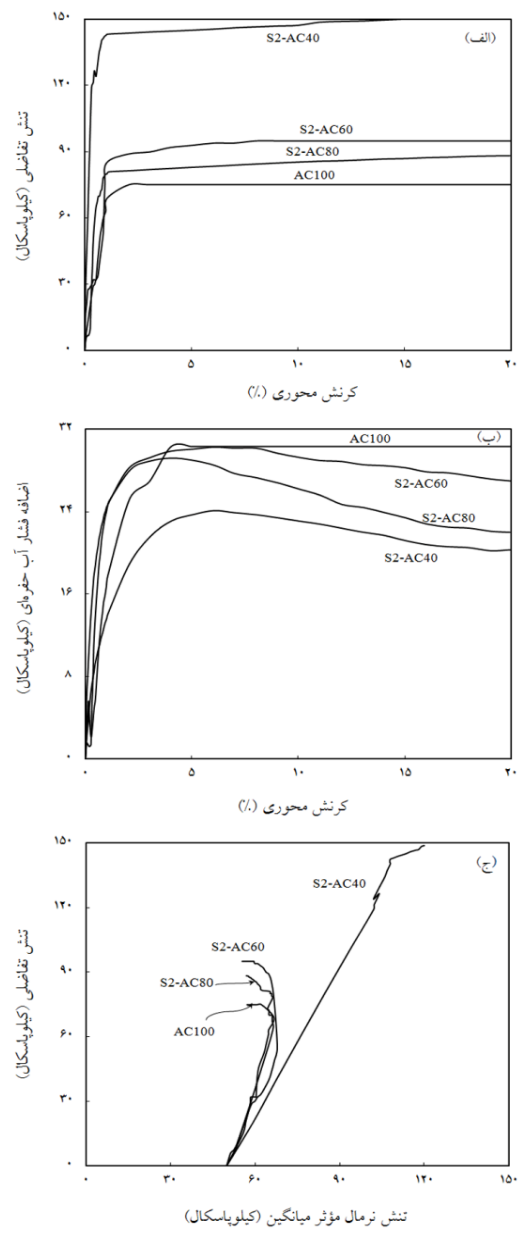
از منحنی‌های تنش- کرنش مشاهده می‌شود در تمامی تنش‌های محصورکننده، با افزایش درصد ماسه از حدی به بعد، روند تغییرات مقاومت برشی افزایشی است. از تغییرات مقاومت برشی نرمالیزه با درصد ماسه برای نمونه‌های مخلوط S1-AC و S2-AC (شکل ۳) ملاحظه می‌شود که در نمونه‌های S1-AC، افزودن ۲۰٪ تا ۴۰٪ ماسه، افزایش چندانی در مقاومت برشی نمونه‌ها نسبت به رس خالص ایجاد نمی‌کند؛ ولی در نمونه‌های S2-AC، سبب افزایش مقاومت برشی می‌گردد. با افزایش ماسه از این حد، مقاومت برشی هر دو مخلوط شدیدا زیاد می‌شود. نرخ افزایش به‌مقدار σ'_c وابسته است و در σ'_cهای بالا کمتر است. برای مثال، میزان افزایش مقاومت نمونه‌های S1-AC40 و S2-AC40 در σ'_c =۵۰ kPa به‌ترتیب ۲۶۰٪ و ۱۱۰٪ می‌باشند.



شکل ۱ نتایج آزمایش‌های نمونه‌های S1-AC در σ'_c = ۱۰۰ kPa : الف) منحنی تنش- کرنش، ب) فشار آب حفره‌ای، ج) مسیر تنش

در شکل (٤) تغییرات مدول تغییرشکل سکانت نرمالیزهٔ نمونه‌ها با درصد ماسه آمده است. دیده می‌شود که، صرف‌نظر از برخی استثناءها، در تمامی تنش‌های محصورکننده با افزودن ۲۰٪ و ٤۰٪ ماسه به رس و افزایش تنش محصورکننده، مدول تغییرشکل نمونه‌ها

زیاد می‌شود. در هر دو مخلوط، با زیاد شدن ماسه از ۴۰٪ به ۶۰٪، این مدول کاهش می‌یابد و از مقدار متناظر رس کمتر است. می‌توان استنتاج نمود که بسته به‌مقدار ماسهٔ موجود در مخلوط تغییرشکل‌پذیری آنها متفاوت است.



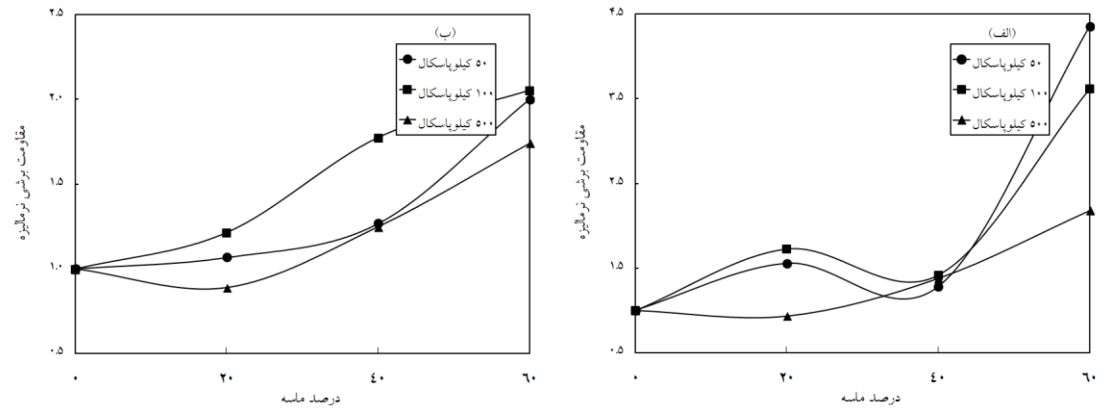
شکل ۲ نتایج آزمایش‌های **نمونه‌های** S2-AC در $\sigma'c = ۵۰$ kPa: الف) منحنی تنش ـ کرنش، ب) فشار آب حفره‌ای، ج) مسیر تنش

اثر درصد ماسه بر اضافه‌فشار آب حفره‌ای (Δu)

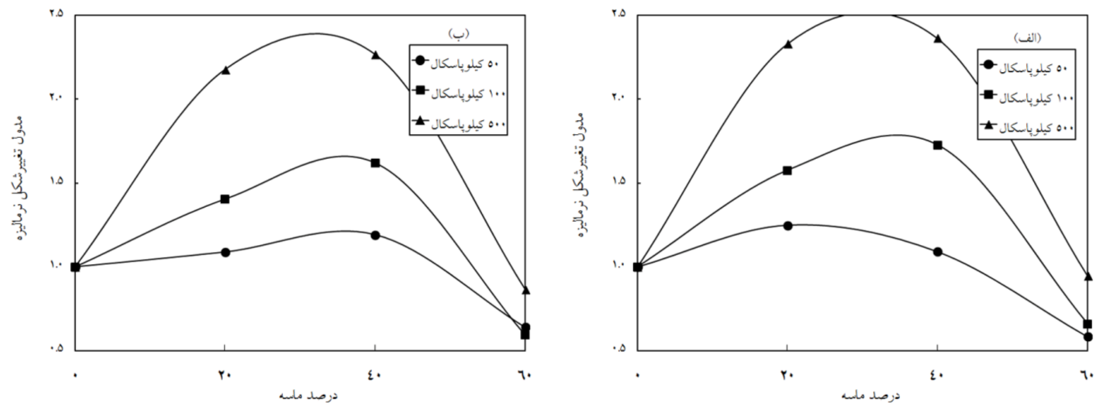
با بررسی رفتار فشار آب حفره‌ای نمونه‌های S1-AC و S2-AC، در تنش‌های ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال (شکل‌های ۱- ب و ۲- ب) مشاهده می‌گردد که حداکثر مقدار Δu عموما در رس خالص به‌وجود می‌آید و مقدار آن با افزودن ماسه به رس کم می‌شود. به‌عبارت دیگر، نمونه‌های مخلوط رس- ماسه در کرنش‌های بالا رفتار اتساعی دارند، به‌طوری‌که در نمونهٔ S1-AC40، به‌دلیل رفتار اتساعی، Δu منفی نیز می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در $\sigma'_c = ۵۰۰$ kPa، با افزودن ماسه به رس Δu بیشتر می‌شود؛ لیکن وقتی مقدار ماسه از ۴۰٪ به ۶۰٪ تغییر می‌کند رفتار مخلوط از انقباضی به اتساعی تغییر می‌کند و Δu کمتر می‌شود. تغییرات فشار آب حفره‌ای حداکثر نرمالیزه ($\Delta u_{max-min}/\Delta u_{max-AC100}$) با درصد ماسه شکل (۵) نشان می‌دهد که افزودن ۲۰٪ ماسه باعث کاهش اندکی در فشار آب حفره‌ای می‌گردد و سپس با افزودن ۴۰٪ و ۶۰٪ ماسه به رس مقدار Δu به‌ترتیب بیشتر و کمتر می‌شود.

اثر درصد ماسه بر منحنی‌های مسیر تنش

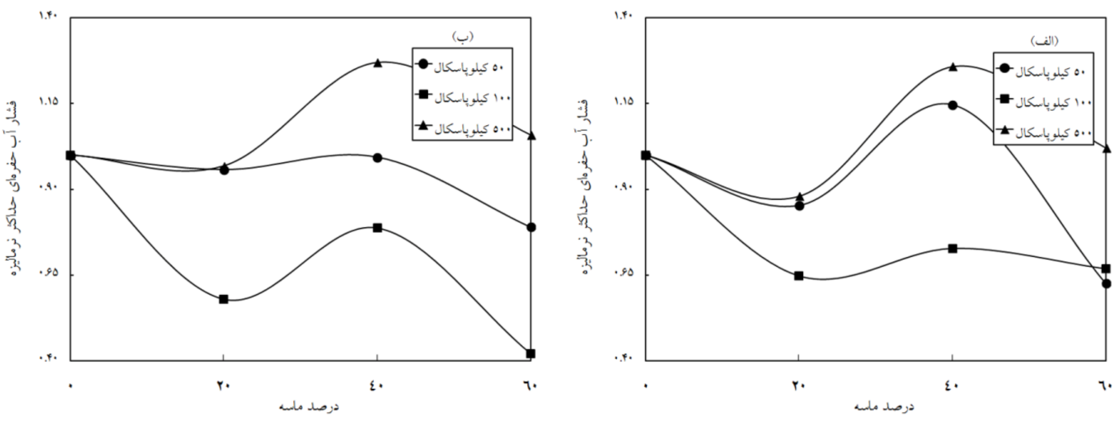
با مطالعهٔ مسیر تنش مؤثر نمونه‌های S1-AC تحکیم‌یافته در تنش ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال (برای مثال منحنی‌های شکل(۱-ج) ملاحظه می‌گردد که رس خالص رفتار انقباضی دارد و با افزودن ۲۰ و ۴۰ درصد ماسه رفتار آن اندکی اتساعی می‌شود. حال آن‌که رفتار نمونه S1-AC40 به‌شدت اتساعی است و علت آن ایجاد فشار آب حفره‌ای منفی می‌باشد که سبب افزایش مقاومت برشی می‌گردد. در تنش محصورکنندهٔ ۵۰۰ kPa رفتار نمونه‌های با درصد ماسهٔ کم انقباضی است، ولی رفتار نمونهٔ S1-AC40 اتساعی می‌باشد. بامقایسهٔ مسیر تنش نمونه‌های مخلوط S2-AC تحکیم‌یافته در تنش ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال (برای مثال منحنی‌های شکل ۲- ج) ملاحظه می‌گردد که رفتار نمونه‌های AC100، S2-AC80 و S2-AC60 انقباضی است و رفتار نمونهٔ S2-AC40 اتساعی می‌باشد.



شکل ۳ تغییرات مقاومت برشی نرمالیزه با درصد ماسه در نمونه‌های مخلوط: الف) S1-AC، ب) S2-AC



شکل ٤ تغییرات مدول تغییرشکل نرمالیزه با درصد ماسه نمونه‌های مخلوط: الف) S1-AC، ب) S2-AC



شکل ۵ تغییرات فشار آب حفره‌ای نرمالیزه با درصد ماسه در نمونه‌های مخلوط: الف) S1-AC، ب) S2-AC

اثر اندازهٔ دانه‌های ماسه

برای مطالعهٔ اثر اندازهٔ دانه‌های ماسه، رفتار نمونه‌های مخلوط با درصد ماسهٔ یکسان و اندازهٔ دانه‌های متفاوت مقایسه می‌شود. متوسط اندازهٔ دانه‌های ماسهٔ S1 (۲/۸۰۵ mm) حدود ۲ برابر متوسط اندازهٔ دانه‌های ماسهٔ S2 (۱/٤٤mm) می‌باشد. بدین منظور، رفتار نمونه‌های S1-AC80، S1-AC60 و S1-AC40 به‌ترتیب با رفتار نمونه‌های S2-AC80، S2-AC60 و S2-AC40 به‌ترتیب

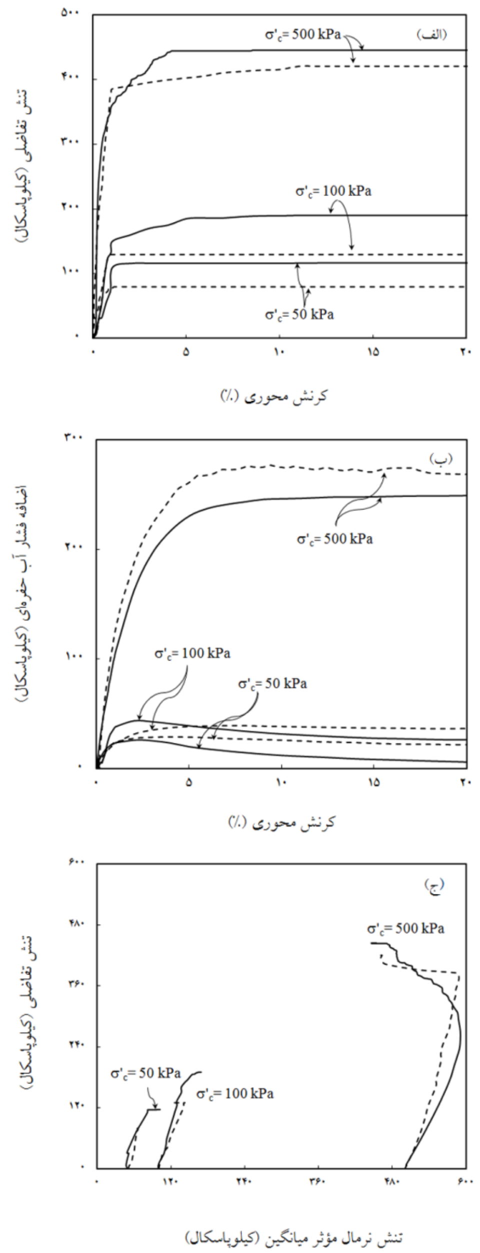
در شکل‌های (٦، ۷ و ۸) مقایسه شده است. در این شکل‌ها خطوط توپر و خطچین به‌ترتیب مربوط به نمونه‌های مخلوط S1-AC و S2-AC می‌باشند.

از بخش (الف) شکل‌ها دیده می‌شود که مقاومت برشی نمونه‌های رس- ماسهٔ S1 نسبت به نمونه‌های رس- ماسهٔ S2 بیشتر است. از بخش (ب) شکل‌ها نیز ملاحظه می‌شود اضافه‌فشار آب حفره‌ای در نمونه‌های مخلوط رس- ماسهٔ S2 نسبت به نمونه‌های مخلوط رس- ماسهٔ S1 زیاد می‌باشد. مقایسهٔ مسیر تنش‌ها (بخش ج شکل‌ها) بیانگر آن است که رفتار نمونه‌های حاوی ۲۰٪ و ٤۰٪ ماسهٔ S1 اتساعی است، حال آن‌که در نمونه‌های مشابه حاوی ماسهٔ S2 رفتار انقباضی است. رفتار تمامی نمونه‌های مخلوط حاوی ٦۰٪ ماسهٔ اتساعی است. همچنین در تنش محصورکنندهٔ ۵۰۰ kPa، رفتار نمونه‌های حاوی ۲۰٪ و ٤۰٪ از هر دو ماسه انقباضی است و با افزایش ماسه از ٤۰٪ به ٦۰٪، رفتار از انقباضی به اتساعی تغییر می‌کند.

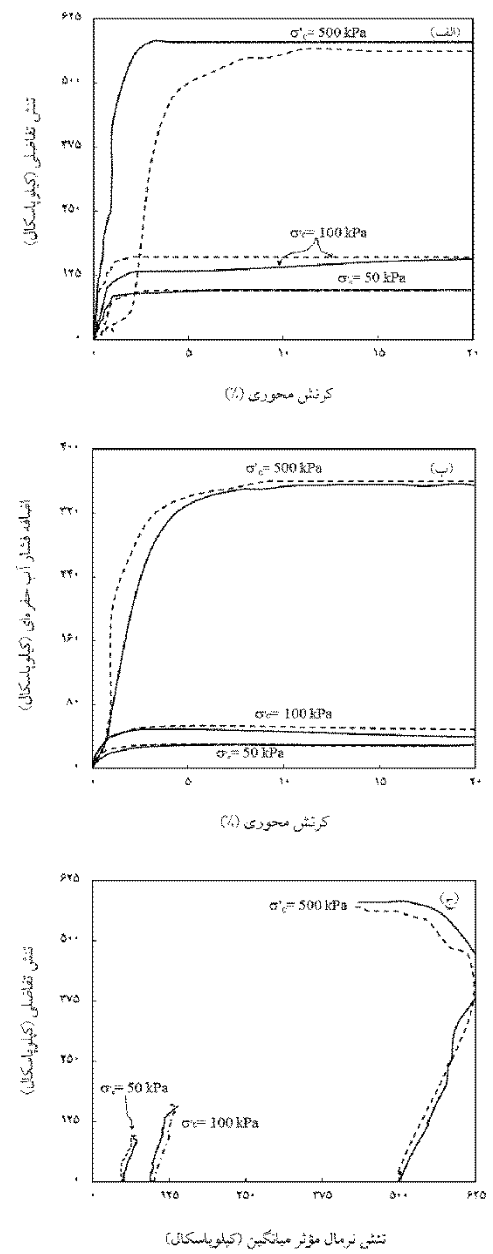
فشار آب حفره‌ای در سطوح تنش یکسان

به‌دلیل نزدیک بودن شرایط تنش سازه‌ها به کنترل تنش در عمل، بااستفاده از نتایج آزمایش سه‌محوری کنترل کرنش، اثر درصد ماسه بر فشار آب حفره‌ای در سطوح تنش مساوی بررسی گردید. در این راستا، از روی نمودارهای تنش- کرنش و فشار آب حفره‌ای، مقادیر Δu نمونه‌ها در سطوح تنش مساوی ($R= \Delta\sigma_d/\sigma'_c=cte$) استخراج شد و تغییرات آن با درصد ماسه برای نمونه‌های S1-AC و S2-AC به‌ترتیب در شکل‌های (۹ و ۱۰) ارائه گردید. از این شکل‌ها می‌توان دریافت که روند تغییرات فشار آب حفره‌ای در تنش‌های محصورکنندهٔ مختلف متفاوت است؛ لیکن این روند برای هر دو نوع مخلوط تقریبا مشابه است.

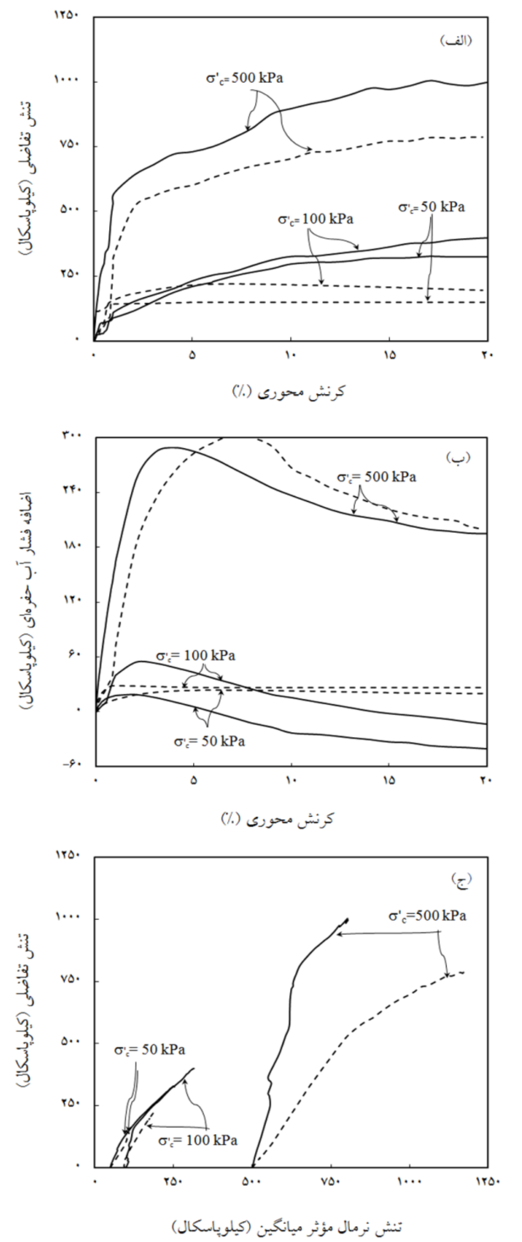
از شکل‌های (۹- الف) و (۱۰- الف) دیده می‌شود که در $\sigma'_c =$ ۵۰ kPa، با افزودن ۲۰٪ تا ٤۰٪ ماسه به رس، فشار آب حفره‌ای بیشتر می‌شود و سپس با بیشتر شدن مقدار ماسه میزان Δu در تمامی سطوح تنش کمتر می‌شود. شکل‌های (۹- ب) و (۱۰- ب) نشان می‌دهند در $\sigma'_c =$ ۱۰۰ kPa افزودن ماسه تا ۲۰٪ به رس، سبب کاهش فشار آب حفره‌ای و پس از آن در نمونه‌های حاوی ٤۰٪ ماسه فشار آب حفره‌ای بیشتر می‌شود و مجددا در نمونه‌های حاوی ٦۰٪ ماسه کم می‌شود.



شکل ٦ رفتار نمونه‌های S1-AC80 و S2-AC80 **تحت** σ'_cهای مختلف: الف) منحنی تنش- کرنش، ب) فشار آب حفره‌ای، ج) مسیر تنش

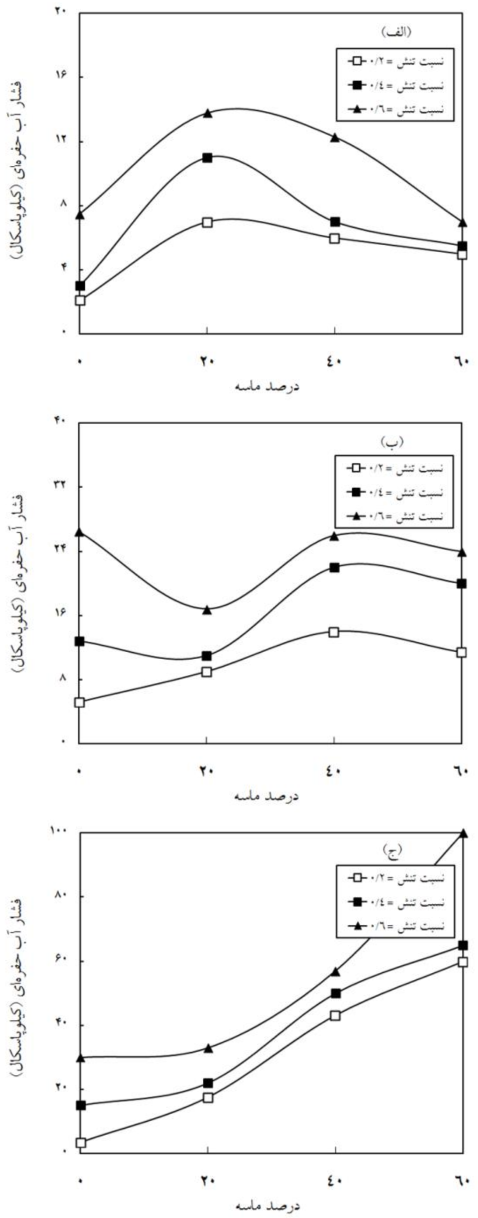


شکل ۷ رفتار نمونه‌های S1-AC60 و S2-AC60 تحت σ'_c‌های مختلف: الف) منحنی تنش- کرنش، ب) فشار آب حفره‌ای، ج) مسیر تنش

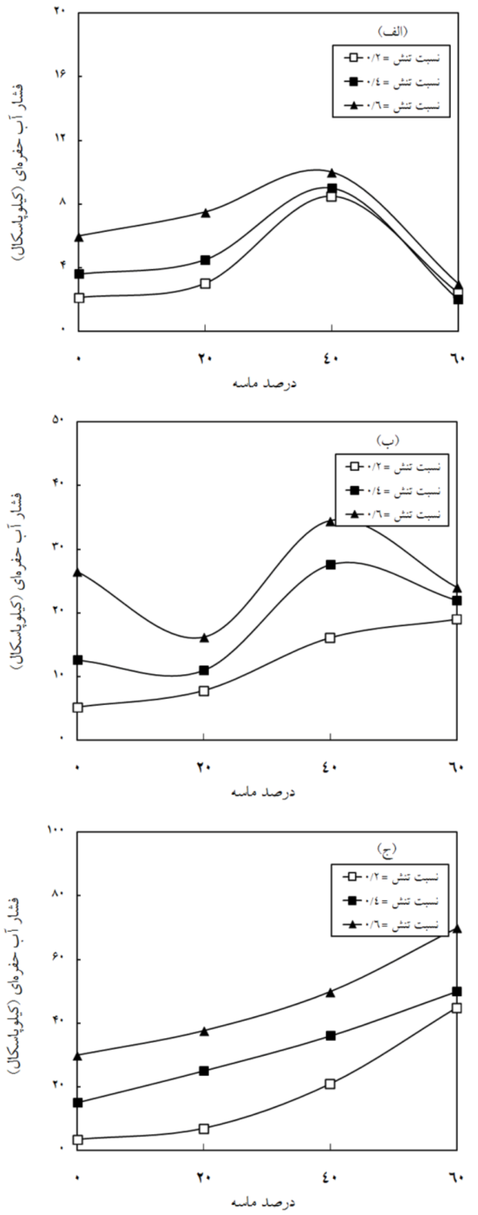


شکل ۸ رفتار نمونه‌های S1-AC40 و S2-AC40 تحت σ'_c‌های مختلف: الف) منحنی تنش- کرنش، ب) فشار آب حفره‌ای، ج) مسیر تنش

شکل‌های (۹- ب) و (۱۰- ب) نشان می‌دهند که در σ'_c = ۱۰۰ kPa افزودن ماسه به رس تا ۲۰٪، سبب کاهش فشار آب حفره‌ای و پس از آن در نمونه‌های حاوی ۴۰٪ ماسه فشار آب حفره‌ای بیشتر می‌شود و مجددا در نمونه‌های حاوی ۶۰٪ ماسه کاهش می‌یابد. در σ'_c = ۵۰۰ kPa (شکل‌های ۹- ج و ۱۰- ج)، با افزودن ماسه به رس مقدار Δu بیشتر می‌شود. با بررسی اثر درصد ماسه بر فشار آب حفره‌ای در سطوح تنش یکسان، سروش و سلطانی [24] نیز روند مشابهی را دنبال نموده و نتیجه گرفتند که صرف‌نظر از مقدار تنش محصورکننده، در سطوح تنش پایین فشار، آب حفره‌ای تقریبا ثابت است، ولی در سطوح تنش بالاتر با افزایش درصد ماسه و شن، فشار آب حفره‌ای کم می‌شود.



شکل ۹ تغییرات فشار آب حفره‌ای نمونه‌های مخلوط S1-AC با درصد ماسه در σ'c‌های
الف) ۵۰ kPa، ب) ۱۰۰ kPa، ج) ۵۰۰ kPa



شکل (۱۰): تغییرات فشار آب حفره‌ای نمونه‌های مخلوط S2-AC با درصد ماسه در σ'c‌های
الف) ۵۰ kPa، ب) ۱۰۰ kPa، ج) ۵۰۰ kPa

بحث بر نتایج

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن ماسه به رس تا یک مقدار حدی تأثیر چندانی در مقاومت برشی نمونه‌ها نسبت به مقدار متناظر رس خالص ایجاد نمی‌کند، ولی اگر مقدار ماسه از این حد بیشتر باشد مقاومت برشی نمونه‌های رس مخلوط نسبت به رس خالص افزایش چشم‌گیری دارد و نرخ افزایش به‌مقدار تنش محصورکننده و اندازهٔ دانه‌ها بستگی دارد. نرخ افزایش در مقاومت در تنش‌های محصورکنندهٔ پایین و مصالح دانه‌ای درشت بیشتر است و مقدار حدی ماسه به‌اندازهٔ دانه‌ها وابسته است. درکل می‌توان استنتاج کرد که نتایج این تحقیق در بخش مقاومت برشی با نتایج سایر

محققان سازگار است[8-11,13,15-18,19,20]. برخی از تحقیقات تأیید کرده‌اند که مقاومت برشی نمونه‌های حاوی دانه‌های ریز نسبت به مقاومت برشی نمونه‌های متناظر با اندازه مصالح دانه‌ای بزرگ کمتر است [۱۵ و 16] که با نتایج مشاهده‌شده در این تحقیق مطابقت دارد.

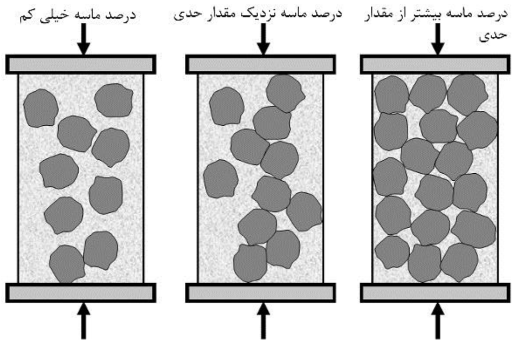
در اکثر تحقیقات قبلی دیده شده است با افزایش ماسه یا شن فشار آب حفره‌ای زیاد می‌شود[8-11,13,15] ، لیکن در این تحقیق در تنش محصورکنندهٔ پایین با افزایش ماسه مقدار فشار آب حفره‌ای کم می‌شود و در تنش‌های محصورکنندهٔ بالا ابتدا زیاد می‌شود و در نمونه‌های حاوی ٦۰٪ ماسه مجددا کمتر می‌شود.

رفتار نمونه‌ها در تنش محصورکنندهٔ ۵۰۰ kPa، با آنچه که پترز و برنی [22] در تنش محصورکنندهٔ kPa ۳٤۵ مشاهده نمودند کاملا سازگار است. در مطالعات آنان مصالح مخلوط در تنش محصورکنندهٔ ۱۰۳ kPa کلا رفتار انقباضی بروز داده‌اند، حال آن‌که در این تحقیق، در σ'_c =۱۰۰ kPa، رفتار رس مخلوط با ٤۰٪ و ٦۰٪ ماسه، اتساعی می‌باشد. علت این تفاوت را می‌توان به اختلاف دانسیتهٔ اولیه نمونه‌ها، نوع کانی رس و اندازهٔ دانه‌های ماسه نسبت داد.

همچنین مشاهده شد که Δu نمونه‌های حاوی دانه‌های ریز نسبت به مقادیر متناظر نمونه‌های حاوی دانه‌های درشت بیشتر است که با نتایج قبل مطابقت دارد [۱۵].

درنهایت می‌توان اشاره نمود درصورتی‌که درصد ماسه از حدی زیاد باشد رفتار از انقباضی به اتساعی تغییر می‌کند. پترز و برنی [23] این مقدار حدی را ٤۵٪–٤۰٪ گزارش کرده‌اند، حال آن‌که سیمپسون برای مقاومت برشی این مقدار را ٦۰٪–٤۰٪ ارائه نموده است [23]. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که این مقدار حدی بسته به اندازهٔ دانه‌های ماسه می‌تواند متفاوت باشد. مقدار حدی ماسه برای تغییر رفتار مخلوط رس– ماسهٔ ریزدانه حدودا ۳۰٪–۲۰٪ می‌باشد، حال آن‌که مقدار مذکور برای مخلوط رس– ماسهٔ درشت‌دانه ۵۰٪–٤۰٪ است.

ایدهٔ اصلی برای این تغییر رفتار را مطابق شکل (۱۱) می‌توان به تغییر ساختار نمونه‌ها از شناور به تماسی و نیز توسعهٔ زنجیر نیروها (Force-chain) با افزایش درصد ماسه و ریزشدن دانه‌های ماسه مرتبط دانست [17].



شکل ۱۱ مفهوم توسعهٔ زنجیر نیروها با افزایش درصد ماسه

در تحقیقات قبلی با زیاد شدن درصد مصالح دانه-ای، مدول تغییرشکل سکانت نمونه‌ها زیاد شده است [۱۵ و ۲٤]، لیکن در این تحقیق روند متفاوتی مشاهده شد. به‌طوری‌که مدول تغییرشکل سکانت نمونه‌های حاوی ٦۰٪ ماسه نسبت به مقدار متناظر نمونه‌های حاوی ٤۰٪ ماسه کم شده است. علت این تفاوت‌ها را می‌توان به تغییر رفتار مصالح از حالت انقباضی به حالت اتساعی و درنتیجه تغییر احتمالی ساختار نمونه‌ها و پایداری یا ناپایداری داخلی با زیادشدن درصد ماسه و زنجیر نیروها نسبت **داد**.

خلاصه و جمع‌بندی

در این مقاله، آزمایش‌های سه‌محوری فشاری زهکشی‌نشده برروی نمونه‌های رس مخلوط با مقادیر مختلف ماسه در تنش‌های محصورکنندهٔ متفاوت انجام شد. از این آزمایش‌ها نتیجه گرفته شد که:

- در تنش‌های محصورکنندهٔ پایین رفتار نمونهٔ رس انقباضی است و رفتار نمونه‌های حاوی ۲۰ و ٤۰ درصد ماسه اندکی اتساعی است و اندازهٔ دانه‌های ماسه نیز در نوع رفتار نمونه‌ها اثر دارد. رفتار نمونه با ٦۰٪ ماسه به‌شدت اتساعی است و علت آن ایجاد فشار آب حفره‌ای منفی در نمونه‌ها می‌باشد. در تنش

محصورکنندۀ بالا رفتار تمامی نمونه‌های حاوی ٦۰٪ ماسه اتساعی و رفتار بقیه نمونه‌ها انقباضی است.

- به‌طور کلی درصورتی‌که مقدار مصالح دانه‌ای در مخلوط زیاد شود رفتار مخلوط ماسه- رس عوض می‌شود. درصد حدی ماسه برای تغییر در رفتار بسته به اندازۀ مصالح دانه‌ای، شرایط اولیۀ نمونه‌ها و مقدار تنش محصورکنندۀ متفاوت است که با نتایج تحقیقات جدید منتشرشده نیز مطابقت دارد.
- افزودن ماسه تا ٤۰٪ به رس اثر چندانی بر مقاومت برشی ندارد، ولی افزودن ٦۰٪ ماسه به رس سبب افزایش شدید در مقاومت برشی می‌شود. این نتایج با نتایج سایر محققان سازگار است و فقط مقدار ماسه حدی متفاوت است.
- مدول تغییرشکل سکانت با افزایش درصد ماسه تا ٤۰٪ افزایش می‌یابد، ولی با افزودن ٦۰٪ درصد ماسه به رس مدول تغییرشکل سکانت مجددا کاهش می‌یابد. این یافته با نتایج تحقیقات قبلی سازگار نیست و علت آن را می‌توان به تغییر احتمالی در ساختار نمونه‌ها، پایداری یا ناپایداری داخلی با زیاد شدن درصد ماسه و زنجیر نیروها نسبت داد.
- فشار آب حفره‌ای در تنش محصورکنندۀ پایین تغییر چندانی ندارد، ولی در تنش محصورکنندۀ بالا، مقدار آن در مخلوط ٤۰٪ ماسه نسبت به بقیه بیشتر است که بنا به دلایل گفته‌شدۀ قبلی با برخی نتایج قبلی در تناقض است، ولی با نتایج تحقیقات اخیر محققان مطابقت دارد.
- در نمونه‌های حاوی ماسۀ ریز، فشار آب حفره‌ای بیشتری ایجاد می‌شود و مقاومت برشی آنها کمتر است که نتایج تحقیقات قبلی را تأیید می‌کند.

مراجع

1. Vallejo, L.E., "Surge Wave Development in Debris Flows", *Soils and Foundations*, Vol. 37, Pp. 115–119, (1997).
2. Vallejo, L.E. and Mawby, R., "Porosity Influence on the Shear Strength of Granular Material–clay Mixtures", *Engineering Geology*, Vol. 58 (2), Pp. 125–136, (2000).
3. Loganathan, N., de Silva, S. and Thurairajah, A., "Strength Correlation Factor for Residual Soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118, Pp. 593–610, (1992).
4. Rahardjo, H., Indrawan, I.G.B., Leong, E.C. and Yong, W.K., "Effects of Coarse-grained Material on Hydraulic Properties and Shear Strength of Top Soil", *Engineering Geology*, Vol. 101, Pp. 165-173, (2008).
5. Abichou, T., Benson, C.H. and Edil, T.B., "Micro-structure and Hydraulic Conductivity of Simulated Sand–bentonite Mixtures", *Clays and Clay Minerals*, Vol. 50, Pp. 537–545, (2002).
6. Pandian, N.S., Nagaraj, T.S. and Raju, P., "Permeability and Compressibility Behavior of Bentonite–Sand/soil mixes", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18, Pp. 86–93, (1995).
7. Holtz, W.G. and Willard, M., "Triaxial Shear Characteristics of Clayey Gravel Soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 82, Pp. 143-149, (1956).
8. Nakase, A., Nakanodo, H. and Kusakabe, O., "Influence of Soil Type on Pore Pressure Response to Cyclic Loading", Proceedings of fifth Japan Earthquake Engineering Symposium, Tokyo, Japan,

(1978).

9. Nakase, A. and Kamei, T., "Undrained Shear Strength Anisotropy of Normally Consolidated Cohesive Soils", *Soils and foundations*, Vol. 23 (1), Pp. 91-101, (1983).
10. Omine, K. and Ochiai, H., Hayashi, S., Umezaki, T. and Otani, J., "Shear Properties of Clay- sand Composite Soils", *Memoirs of the Faculty of Engineering*, *Kyushu University*, Vol. 49 (4), Pp. 213-228, (1989).
11. Kimura, T. Takemura, J. Hiro-Oka, A. and Okamara, M., "Mechanical Behavior of Intermediate Soils", *Proceedings of International Conference Centrifuge*, A.A. Balkema, Rotterdam, (1994).
12. Bayoglu, E., "Shear Strength and Compressibility Behavior of Sand-clay Mixtures", MSc Thesis, Department of Civil Engineering, Middle-East Technical University, Ankara, Turkey, (1995).
13. Jafari, M.K. and Shafiee, A., "Mechanical Behavior of Compacted Composite Clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, Pp. 1152-1167, (2004).
14. Prakasha, K.S. and Chandrasekaran, V.S. "Behavior of Marine Sand-clay Mixtures under Static and Cyclic Triaxial Shear", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, Pp. 213-222, (2005).
15. سلطانی جیقه، حسین؛ سروش، عباس، «رفتار خاک‌های رسی مخلوط تحت بارگذاری یکنواخت»، نشریهٔ علمی- پژوهشی امیرکبیر، شمارهٔ ج-٦٧، ص. ٢١- ٢٩، (١٣٨٦).
16. Soltani-Jigheh, H., Jafari, K. and Golipoor, B., "Shrinkage and Shear Behavior of Compacted Clay-sand Mixtures", *9th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE2010)*, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, (2010).
17. Peters, J.F. and Berney IV, E.S., "Percolation Threshold of Sand-clay Binary Mixtures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, Pp. 310-318, (2010).
18. Pakbaz M.S. and Siadati Moqaddam, A., "Effect of Sand Gradation on the Behavior of Sand-clay Mixtures", *International Journal of GEOMATE*, Vol. 3, Pp. 325-331, (2012).
19. Simpson, D.C. and Evans, T. M., "Behavioral Thresholds in Mixtures of Sand and Kaolinite Clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 142, doi:10.1061/(ASCE) GT.1943-5606.0001391, 04015073, (2015).
20. Jiang, X., Cui, P. and Ge, Y., "Effects of Fines on the Strength Characteristics of Mixtures", *Engineering Geology*, Vol. 198, Pp. 78–86, (2015).
21. Elkady, T.Y., Shaker, A.A. and Dhowain, A.W., "Shear Strengths and Volume Changes of Sand–Attapulgite Clay Mixtures", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 74, Pp. 595–609, (2015).
22. ASTM. Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (ASTM D 698). American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, In Annual Book of ASTM Standards, 04.08 (1997).

23. ASTM. Standard test methods for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils (ASTM D 4767), American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, In Annual Book of ASTM Standards, 04.08 (2004).
24. Soroush, A. and Soltani Jigheh, H., "Pre- and Post-cyclic Pehavior of Mixed Clayey Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, Pp. 1-14, (2009).